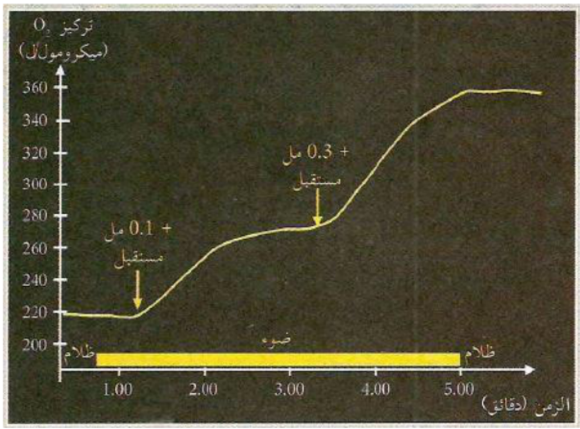
المجال التعلمي رقم (02): التحولات الطاقويـــة

الوحدة التعلمية الأولى آليات تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية كامنة

النشاط 3 : تفاعلات المرحلة الكيموضوئية

1- شروط عمل التيلاكويد:

أ) التجربة (1) شروط انطلاق O_2 :



لاحظ الوثيقة (1) ص 180

- **تحليل المنحنى :** في الظلام كمية O_2 في الوسط ثابتة ، أي عدم انطلاق O_2 في الظلام

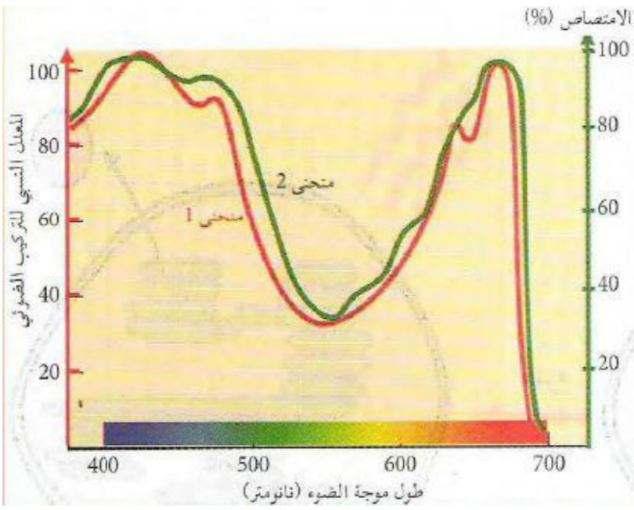
في وجود الضوء أيضًا كمية O_2 ثابتة أي لا يتم انطلاق O_2 في غياب المستقبل رغم توفر الإضاءة

في وجود الضوء و المستقبل تزداد كمية O_2 المنطلقة بزيادة كمية المستقبل أي أن وجود الضوء لوحده كان غير كاف لانطلاق O_2

- **نوع التفاعل :** حدث تفاعل إرجاع للمستقبل (استقبال إلكترونات) الذي تحول من اللون الأحمر إلى اللون الأخضر ، لكن في عملية التركيب الضوئي هو تفاعل أكسدة أدت إلى تحرير الإلكترونات التي قامت بإرجاع المستقبل
- **شروط إنطلاق الأكسجيـن :**

توفر الإضاءة و مستقبل للإلكترونات

ب) التجربة (2) : تأثير ألوان الطيف على عمل التيلاكويد :



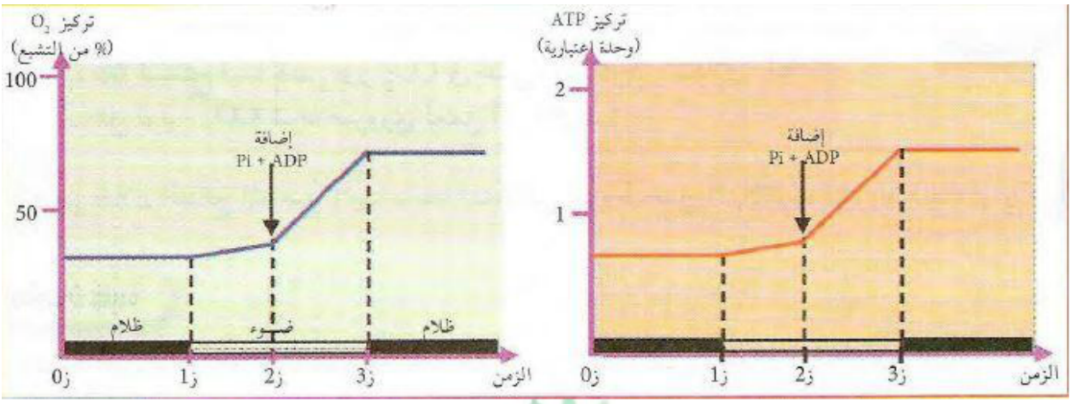
(لاحظ الوثيقة (2) ص 181)

- أطوال موجات الضوء الأكثر فعالية هي المحصورة بين المجالين [400 , 500] وَ [600 , 700] نانومتر ، أي الموجات الطرفية ، الحمراء ، الزرقاء ، و البنفسجية
- المقارنة بين المنحنيين : هناك توافق (تطابق) بين منحنى طيف إمتصاص اليخضور الخام و طيف نشاط التركيب الضوئي

النتيجة : أطوال الموجات الأكثر امتصاصًا من قبل اليخضور الخام هي الاكثر فعالية في شدة التركيب الضوئي

ج) التجربة (3) : تأثير الـ ADP و Pi على عمل التيلاكويد :

لاحظ الوثيقة (3) ص 181 :

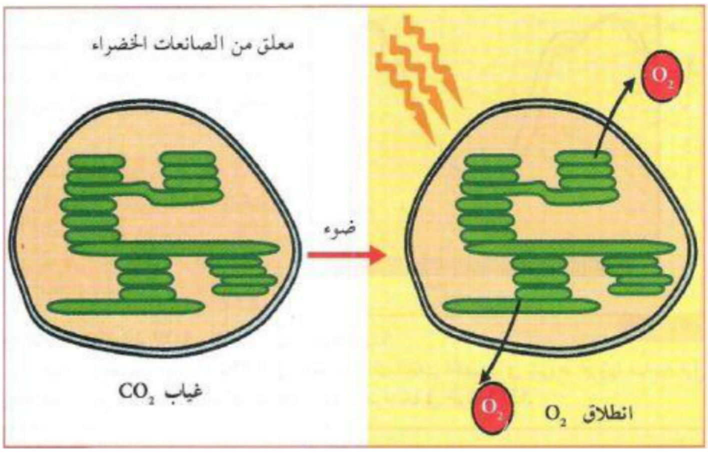


تحليل مقارن للمنحنيين :

تؤدي إضافة الـ ADP و Pi إلى ارتفاع كل من O_2 و ATP في وجود الضوء (أي ارتفاع شدة التركيب الضوئي المعبر عنها بزيادة O_2 المنطلق و ارتفاع تركيز الـ ATP) .

الإستنتاج : للـ ADP و Pi تأثير محفز للتركيب الضوئي

د) دور CO_2 في عملية التيلاكويد: (لاحظ الوثيقة (4) ص 182)



- استنتاج دور CO_2 في عمل التيلاكويد : CO_2 غير ضروري لعمل التيلاكويد و ذلك لأن انطلاق O2 يتم في غياب CO_2
- CO_2 ليس شرطا لعمل التيلاكويد (انطلاق O_2) و إنما شرط لعمل الحشوة .

النتيجة :

شروط عمل التيلاكويد (انطلاق O2) هي الإضاءة و مستقبل للإلكترونات و توفر ADP و Pi

2- آلية عمل التيلاكويد :

أ) إظهار مصدر الأكسجين المنطلق :

- تجربة : في شروط تجريبية مناسبة تسمح بقياس O_2 المنطلق وضعت الكلوريلا (أشنة خضراء) في وسطين يحتوي كل منهما على 4% من CO_2 و معرضين للضوء ، حيث يحتوي الوسط الأول على CO_2 ذو أكسجين مشع بينما يحتوي الوسط الثاني على H_2O أكسجينه مشع ، النتائج موضحة في الجدول التالي :

الوسط	الجزيئة الحاملة للإشعاع	الأكسجين المنطلق
الأول	CO_2 *	غير مشع
الثاني	H_2O *	مشع

- **النتيجة :**

مصدر O_2 المنطلق هو المـــاء و ليس CO_2

ب) مصدر الإلكترونات لإرجاع المستقبل الإصطناعي (شوارد الحديد) :

أمكن تلخيص التفاعلات التي أدت إلى تحول لون المحلول و انطلاق O_2 في التجربة الممثلة في الوثيقة (1) ص 180 في المعادلة التالية :

$$2H_2O + 4Fe^{3+} \xrightarrow[\text{يخضور}]{\text{ضوء}} 4Fe^{2+} + O_2\uparrow + 4H^+$$

(1 : من $2H_2O$ نحو $O_2 + 4H^+$ ؛ 2 : من $4Fe^{3+}$ نحو $4Fe^{2+}$)

- **تحديد نوع التفاعل الذي حدث في (1) و (2) :**

التفاعل (1) : تفاعل أكسدة ، و التفاعل (2) : تفاعل إرجـاع .

- **تفسير التفاعل (2) :** هو تفاعل إرجاع حيث تم إرجاع شوارد الحديد من الصورة الثلاثية إلى الصورة الثنائية (من Fe^{3+} إلى Fe^{2+})

أي أن المستقبل و هو شوارد الحديد في التجربة قد أرجع عن طريق الإلكترونات الناتجة من أكسدة الماء

- يؤكد التفاعل (1) (تفاعل أكسدة الماء) أن مصدر الأكسجين المنطلق خلال عملية التركيب الضوئي هو الماء بعد حدوث عملية الأكسدة .

- **تمثيل التفاعلين (1) و (2) بمعادلتين بسيطتين :**

- التفاعل (1) : الأكسدة : حيث يتم أكسدة الماء إلى بروتونات و إلكترونات و O_2 ينطلق كما يلي:

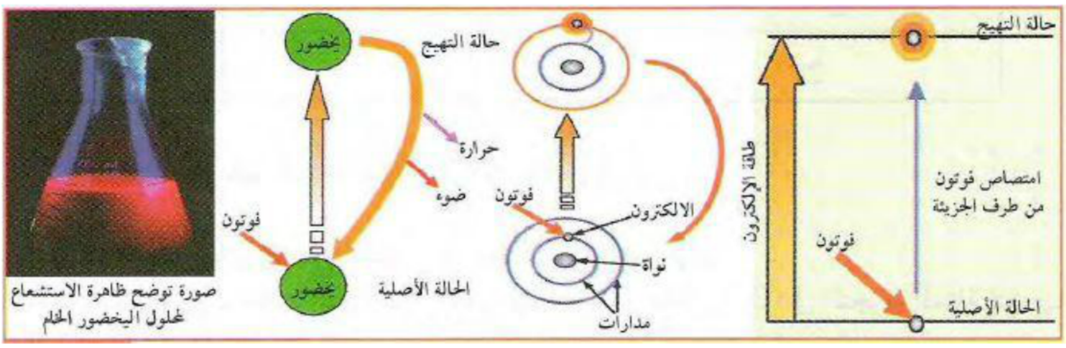
$$2H_2O \xrightarrow{\text{أكسـدة}} 4H^+ + 4e^- + O_2\uparrow$$

- التفاعل (2) : إرجـــاع : حيث يتم إرجاع شوارد الحديد بالإلكترونات المحررة كما يلي :

$$4Fe^{3+} + 4e^- \xrightarrow{\text{إرجـاع}} 4Fe^{+2}$$

ج) دور اليخضور و الضوئ في إرجاع مستقبل الإلكترونات :

ج) 1 – تجربة التفلور (الإستشعاع) : (لاحظ الوثيقة (5) ص184)



تفسير ظهور اللون الأحمر (ظاهرة الإستشعاع) : يفسر ظهور اللون الأحمر على أنه ضوء صادر من اليخضور بعد حدوث تهيج بسبب اكتساب الإلكترون طاقة و الانتقال إلى مدار ذو طاقة أعلى .

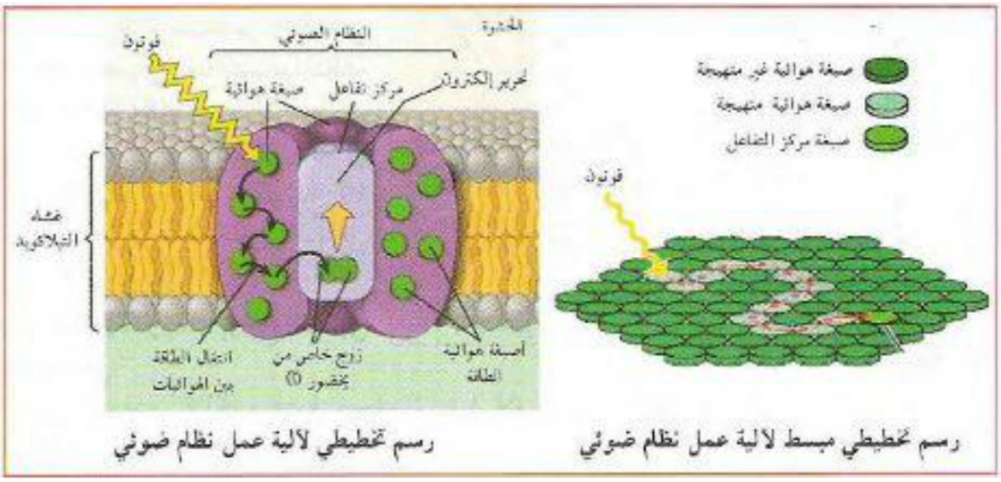
مصير الطاقة و الإلكترونات في التجربة : الإلكترون يعود إلى مداره الأصلي بينما تفقد الطاقة في شكل حرارة و ضوء

تهدف تجربة التفلور إلى تثبيت فكرة اكتساب الصبغات اليخضورية للطاقة و حدوث التهيج بانتقال الإلكترونات إلى مدار خارجي لكن التفلور تم على صبغات مستخلصة من نسيج نباتي (صبغات فقدت توضعها الطبيعي)

ماذا يحدث في حالة الصبغات المتواجدة ضمن الأنظمة الضوئية التي تفقد توضعها الطبيعي (ضمن الانسجة النباتية)

ج) 2 – آلية عمل الأنظمة الضوئية :

- **تأثير فوتونات الضوء على الانظمة الضوئية :** (لاحظ الوثيقة (6) و (7) ص185)



رسم تخطيطي لآلية عمل نظام ضوئي — رسم تخطيطي مبسط لآلية عمل نظام ضوئي

- **الوثيقة (6) ص185 :**
- عند سقوط فوتونات ضوئية على أصبغة هوائية في النظام الضوئي فإن الأصبغة الهوائية تلتقط (تستقبل) الطاقة الضوئية ثم تنقلها إلى أصبغة مركز التفاعل .
- دور الأصبغة الهوائية في النظام الضوئي هو استقبال و نقل الطاقة الضوئية دون فقط إلكترونات ، بينما أصبغة مركز التفاعل فتفقد إلكترونات ، أي تتم فيها علية الأكسدة .
- **سبب تسمية جزيئات من اليخضور في النظام الضوئي بمركز التفاعل :** وذلك لحدوث تفاعل الأكسدة ، أي فقدها للإلكترونات .
- **تحليل معطيات الجدول و الوثيقة (7) :**



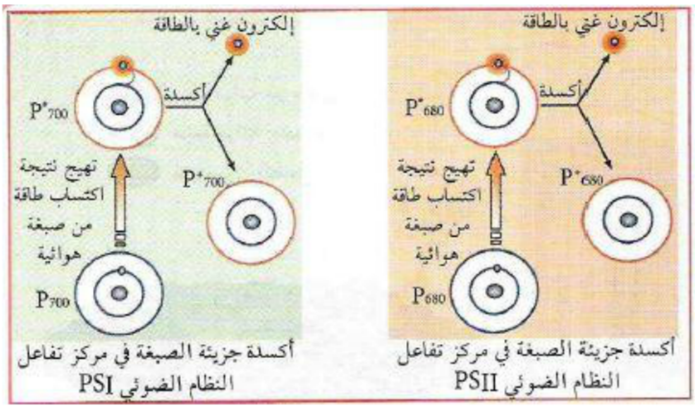
التسمية	نوع الصبغة	عدد الجزيئات / نظام ضوئي	الرمز المستعمل
أصبغة هوائية	يخضور أ يخضور ب	عدة مئات	P1, P2, P3,.......Pn
	أشباه الجزرين (أصبغة مساعدة)	عشرات	
أصبغة مركز التفاعل	يخضور أ	2 فقط	P_{680} في PSII P_{700} في PSI

كل من نظام الـ PS I و PS II يتكون من : مئات الأصبغة الهوائية التي يرمز لها بـ P مضاف إليه رقم (P_1، P_2 ... P_m) ، و جزيئتي من صبغة مركز التفاعل يرمز لها بـ P مضاف إليه أرقام تمثل أطوال

الموجات التي يكون عندها امتصاص هذه الأصبغة أعظميا ، حيث : P680 تمثل صبغة مركز التفاعل في PS II ، P700 تمثل صبغة مركز التفاعل في PS I
و دور الأصبغة الهوائية هو استقبال الطاقة الضوئية ثم نقلها بينما صبغة مركز التفاعل هو استقبال الطاقة الضوئية التي تصله من الأصبغة الهوائية و فقد إلكترون غني بالطاقة (أكســدة) .

الإستخلاص : تستقبل الصبغة الهوائية P I الفوتون و تتهيج حيث ينتقل إلكترون من مداره الأصلي إلى مدار خارجي أعلى طاقة ثم يعود إلى مداره الأصلي **(لا يُفقد)** ، بينما تفقد الطاقة و تلتقطها صبغة هوائية أخرى PII و تتهيج هي الأخرى بانتقال إلكترون من مداره الأصلي إلى مدار خارجي ، ثم يعود إلى مداره الاصلي ، و الطاقة تفقد و تلتقطها هوائيات أخرى P III و هكذا ، حتى تصل الطاقة إلى صبغة مركز التفاعل فتتهيج و تفقد إلكترون غني بالطاقة (تتأكسد) .

- **الوثيقة (8) ص186 :** المقارنة بين انتقال الطاقة في الأصبغة الهوائية و انتقالها في أصبغة مركز التفاعل :



انتقال الطاقة بين الأصبغة الهوائية يتم دون انتقال الإلكترونات (انتقال الطاقة دون الإلكترون) بينما تنتقل الطاقة و الإلكترون في صبغة مركز التفاعل ، أي أن صبغة مركز التفاعل تتأكسد عند وصول الطاقة إليها من الأصبغة الهوائية .

- **مصدر إلكترونات إرجاع المستقبل الاصطناعي :** لتوضيح مصدر الإلكترونات في إرجاع المستقبل الاصطناعي للإلكترونات (شوارد الحديد) نستعرض المعادلات التالية:

$$2H_2O + 4Fe^{3+} \xrightarrow[\text{يخضور}]{\text{ضوء}} 4Fe^{2+} + O_2 \uparrow + 4H^+$$

(1) ، (2)

$$2P^*_{680} \longrightarrow 2P^+_{680} + 2e^- \text{ عالية الطاقة}$$

$$2P^*_{700} \longrightarrow 2P^+_{700} + 2e^- \text{ عالية الطاقة}$$

بتأثير الفوتونات الضوئية تفقد الأنظمة الضوئية إلكترونات ، أي أن مصدر الإلكترونات التي ترجع Fe^{3+} هو الأنظمة الضوئية و أن انتقال الإلكترونات لا يكون مباشرة من المــاء إلى شوارد الحديد .

سؤال: ماهو مصير PS I و ماهو مصير البروتونات الناتجة من تحلل الماء ؟

3- تسلسل تفاعلات المرحلة الكيموضوئية :

- مصير النظام الضوئي الأول للـ PS I :

$$PSI \xrightarrow{\text{الضوء}} PS_I^{2+} + 2e^-$$

$$NADP^+ + 2e^- + 2H^+ \longrightarrow NADPHH^+$$

- التعرف على آلية إنتقال الإلكترونات :

سقوط الضوء على PS I يؤدي إلى فقد المركز التفاعلي الإلكترونات و في نفس الوقت يتحلل الماء إلى إلكترونات و بروتونات و أوكسجين لينسب PS II إلكترونات الماء و يعوض النقص في إلكترونات الماء من PS I نفسها لكن لا يتحلل الماء و تنتقل إلكترونات الماء ذات الطاقة العالية كما يلي : $TH_2 \longrightarrow T_1 + 2e^- + 2H^+$ (الحشوة)

ينتقل بعد ذلك الإلكترون من T_1 كمون (أكسدة و إرجاع) منخفض إلى T_2 (كمون أكسدة و إرجاع)

$$T_1H_2 \longrightarrow T_1 + 2e^- + 2H^+$$

$$T_2 + 2e^- + H_2 \longrightarrow T_2H_2$$

تنتقل الإلكترونات بعد ذلك من T_2 إلى T_3 مع تحرير طاقة

$$T_2H_2 \longrightarrow T_2 + 2e^- + 2H^+$$

$$2T_3 + 2e^- \longrightarrow 2T_3 + e^-$$

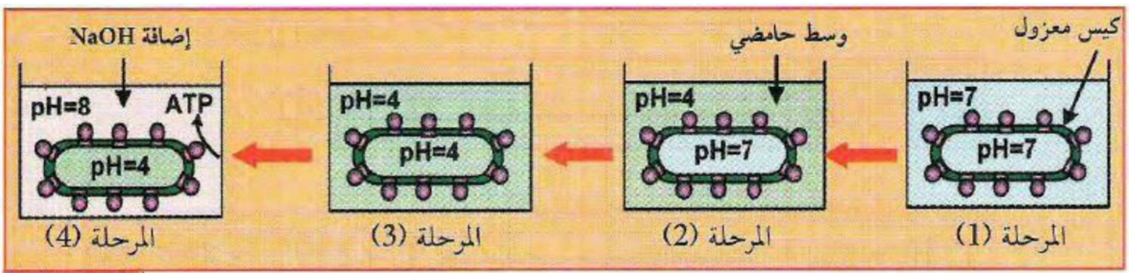
إرجاع

- تنتقل الإلكترونات من T_3 إلى PS I وفقا لكمون الأكسدة و الإرجاع مع تحرير طـاقة .

و بنفس الطريقة تنتقل الإلكترونات PS I إلى $NADP^+$ مؤكسد بواسطة ناقلية T_1 و T_2.

سؤال: ما هو مصير البروتونات الناتجة من تحلل الماء أو العائدة أو الداخلة من الحشوة ؟

- **تجربة 1:**



عدم تشكيل ATP	عدم تشكيل ATP	عدم تشكيل ATP	تشكيل ATP

تفسير النتائج:

- م1: عدم تشكيل ATP لعدم خروج البروتونات لتعادل PH .
- م2: عدم تشكيل ATP لعدم خروج البروتونات لأن الوسط الخارجي حامضي.
- م3: عدم خروج البروتونات لتعادل حمض الوسطين PH .
- م4: تشكيل الـ ATP لخروج البروتونات لكون الوسط الخارجي قاعدي .

- **تجربة 2 :**
نعيد إنجاز المرحلة (4) بعد تخريب الكريات المذنبة .

الملاحظة : عدم تشكيل الـ ATP .

التفسير: عدم تشكيل الـ ATP لعدم خروج البروتونات لتخريب الكريات المذنبة .

آلية تركيب الـ ATP : يتم تركيب الـ ATP إنطلاقا من الـ ADP و Pi الموجودتين في الحشوة بواسطة الكرية المذنبة (إنزيم الـ ATP سنتتاز) حيث يقوم الإنزيم بتشغيل رابطة بين ADP و Pi باستعمال طاقة تستمد من خروج البروتونات عبر الكرات المذنبة نتيجة ارتفاع تركيزها داخل تجويف الكييس و انخفاضها في الحشوة .

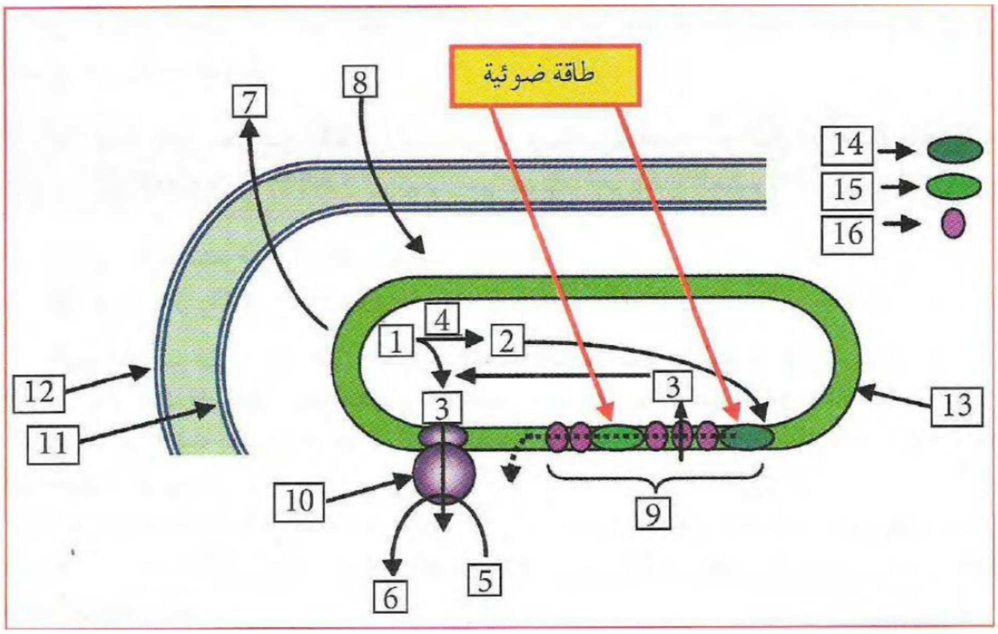
معادلة تشكيل الـ ATP : (فسفرة الـ ADP) :

$$ADP + Pi \xrightarrow{\text{ATP Synthétase}} ATP$$

شروط تركيب الـ ATP :

- وجود فرق في تركيز البروتونات (تركيز مرتفع في تجويف الكييس)
- توفر الـ ATP سنتتاز (الكرية المذنبة)
- وكذلك توفر الـ ADP (الأدينوزين ثنائي الفوسفات) و الـ Pi (الفوسفور اللاعضوي) .

تمثل الوثيقة (13) ص191 رسمًا تخطيطيًا يوضح مختلف التفاعلات في المرحلة الكيموضوئية :



1. **كتابة بيانات الوثيقة (13) ص 191 :**

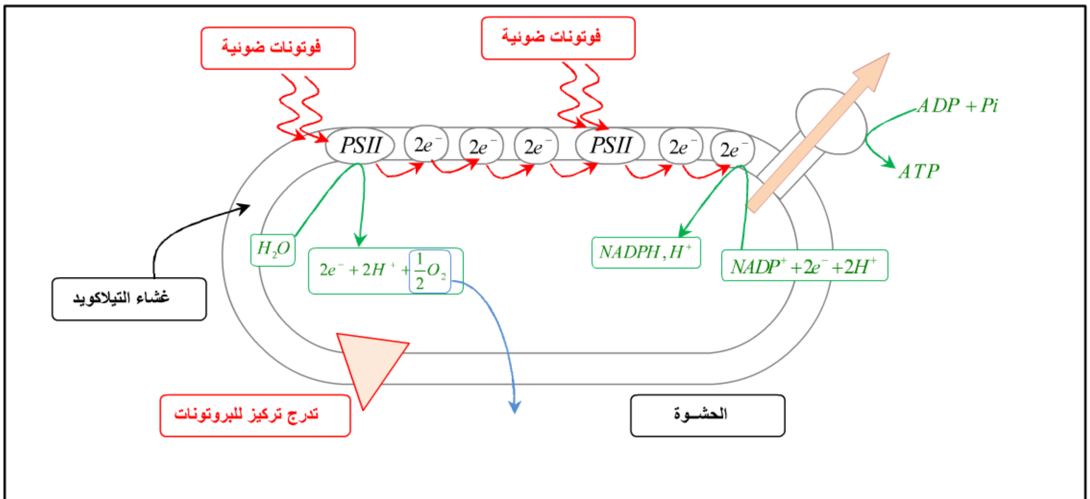
1) ⟵ H_2O .
2) ⟵ إلكترونات .
3) ⟵ بروتونات .
4) ⟵ إنزيم محلل للماء.
5) ⟵ Pi + ADP .
6) ⟵ ATP .

7) ⟵ O_2 .
8) ⟵ CO_2 .
9) ⟵ السلسلة التركيبية الضوئية
10) ⟵ كرية مذنبة (ATP سنتتاز)
11) ⟵ الغشاء الداخلي للصانعة الخضراء
12) ⟵ الغشاء الخارجي للصانعة الخضراء
13) ⟵ غشاء التيلاكويد
14) ⟵ النظام الضوئي PS II .
15) ⟵ النظام الضوئي PS I .
16) ⟵ نواقل الإلكترونات .

2. نواتج المرحلة الكيمو ضوئية هي الـ ATP و $NADPH,H^+$ و O_2

3. دور العنصرين (14) و (15) : يمثلان النظامان الضوئيان PS I و PS II ، و دورهما يتمثل في استقبال و تحويل الطاقة الضوئية في صورة إلكترونات غنية بالطاقة .

4. **مخطط يلخص خطوات المرحلة الكيموضوئية :**



مخطط يلخص خطوات المرحلة الكيموضوئية

خلاصة :

- تتأكسد جزيئة اليخضور لمركز التفاعل تحت تأثير الفوتونات المقتنصة متخلية عن إلكترون .
- تسترجع جزيئة اليخضور المؤكسدة ضوئيا شكلها المرجع و بالتالي قابلية التنبيه انطلاقا من الإلكترونات الناتجة عن التحلل الضوئي للماء.
- تنتقل الإلكترونات الناتجة عن مركز التفاعل في سلسة من النواقل متزايدة كمون الأكسدة و الإرجاع
- إن المستقبل الأخير للإلكترونات الناتجة عبارة عن ناقل للبروتونات و الإلكترونات يدعى $NADP^+$ (النيكوتين أميد ثنائي النيكليوتيد فوسفات) الذي يرجع إلى $NADPH,H^+$ بواسطة إنزيم $NADP$ (ريداكتوز) حسب التفاعل العام التالي:

$$2(NADP^+)+2H_2O \longrightarrow 2(NADPH,H^+)+O_2$$

- يصاحب نقل الإلكترونات على طول سلسلة الأكسدة الإرجاعية تراكم البروتونات الناتجة عن التحلل الضوئي للماء و تلك المنقولة من الحشوة باتجاه تجويف التيلاكويد .
- إن تدرج تركيز البروتونات المتولد من تجويف الكييس و حشوة الصانعة الخضراء ينتشر على شكل سيل من البروتونات الخارجة عبر الـ ATP سنتتاز .
- تسمح الطاقة المتحررة من سيل البروتونات الخارجة بفسفرة الـ ADP إلى ATP في وجود الفوسفات اللاعضوي (الـPi) ، إنها **الفسفرة التأكسدية** .